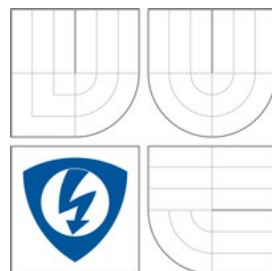


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

MĚŘENÍ TEPLoty VÝFUKOVÝCH PLYNŮ U PROUDOVÉHO MOTORU

TEMPERATURE MEASUREMENT OF JET ENGINE EXHAUST GAS

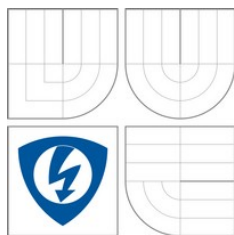
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PAVEL TUNKR

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. ZDENĚK HAVRÁNEK, Ph.D.



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky a
komunikačních technologií**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Automatizační a měřicí technika

Student: Pavel Tunkr
Ročník: 3

ID: 77661
Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Měření teploty výfukových plynů u proudového motoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- 1) Zpracujte literární průzkum metod měření teploty výfukových plynů u proudových motorů. Vytvořte přehled vhodných typů snímačů pro tato prostředí (dle rozsahu měřených a pracovních teplot).
- 2) Navrhněte měřicí převodník využívající termoelektrický článek pro měření teploty, uvažujte teplotní kompenzaci srovnávacího spoje a teplotní kompenzaci celého zařízení. Součástí návrhu je i výběr vhodného snímacího elementu. Navrhovaný měřicí převodník by měl mít následující parametry:
 - rozsah měř. teplot $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+950\text{ }^{\circ}\text{C}$, rozsah prac. teplot a tepl. kompenzace $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$
 - analogový výstup 0 až 3 V, napájení +5 V, možnost kontroly obvodu termočlánku
- 3) Realizujte převodník teplota/napětí pro měření výfukových plynů dle uvedených parametrů. Dbejte pokynů zadavatele práce.
- 4) Ověřte metrologické parametry realizovaného zařízení (měřicí rozsah, přesnost měření, funkčnost teplotní kompenzace – vliv pracovních teplot).
Práce je realizována ve spolupráci s PBS Velká Bíteš, a.s.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Kreidl, M. Měření teploty – senzory a měřicí obvody. BEN Technická literatura, 2005, 240 s. ISBN 80-7300-145-4.
- [2] Lipták, B Instruments engineers handbook, CRC Press, 2003, 1424 s. ISBN 978-0801981975.
- [3] Mikan, J. Měření plynu. GAS, Říčany u Prahy 2003. 1. vydání, 352 str.

Termín zadání: 8.2.2010

Termín odevzdání: 31.5.2010

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

prof. Ing. Pavel Jura, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona c. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI, díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Vysoké učení technické
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav automatizace a měřicí techniky

Měření teploty výfukových plynů u proudového motoru

Bakalářská práce

Studijní obor: Automatizace a měřicí technika
Student: Pavel Tunkr
Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D.

Abstrakt:

V této bakalářské práci jsou na úvod stručně popsány proudové motory, jejich princip a metody měření teploty výfukových plynů. Jsou zde uvedeny možné druhy snímačů teploty a vybrán vhodný typ snímače pro danou aplikaci. Je zde řešeno propojení snímače teploty a převodníku. V další části je zpracován návrh elektronického převodníku teplota/napětí a jeho simulace pomocí programu NI Multisim. Po realizaci funkčního vzorku a změření jeho parametrů jsou zde publikována naměřená data a dosažené výsledky.

Klíčová slova:

proudový motor, termočlánek, srovnávací spoj, kompenzační vedení, zesilovač typu „rail to rail“

Brno University of Technology
Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Control and Instrumentation

Temperature measurement of jet engine exhaust gas

Bachelor's thesis

Specialisation of study: Automation and Measurement
Student: Pavel Tunkr
Supervisor: Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D.

Abstract:

In this bachelor's thesis are preliminary shortly described turbojet engine, their principle and method exhaust gas temperature measurement. Are here mentioned possible to sorts sensors temperature and chosen fit type sensor for given to application. Is here buckthorn connection sensor temperature and inverter. In next parts is processed proposal electronic inverter temperature/voltage and his simulation by the help of programme NI Multisim. After realization functional sample and measured his parameters are here publicize measuring data and achieved record.

Key words:

turbojet engine, thermocouple, cold junction, thermocouple compensation cable, rail to rail amplifier

Bibliografická citace:

TUNKR, P. *Měření teploty výfukových plynů u proudového motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 47 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma měření teploty výfukových plynů u proudového motoru jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.“

V Brně dne: 31. května 2010

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Zdeňku Havránkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: 31. května 2010

.....

podpis autora

Obsah

1 Úvod.....	9
2 Turbínové motory.....	10
2.1 Rozdělení turbínových motorů.....	10
2.1.1 Jednoproudové motory s axiálním nebo radiálním kompresorem.....	11
2.1.2 Dvouproudové motory s celkovým nebo částečným předním obtokem.....	12
2.1.3 Turbohřídelové a turbovrtulové motory.....	13
2.2 Teploty turbínových motorů.....	14
2.2.1 Rozložení teplot na proudovém motoru.....	14
2.2.2 Výfukové plyny a měření jejich teploty.....	14
3 Snímače teploty.....	16
3.1 Vhodné typy snímačů teploty.....	16
3.2 Speciální snímače používané v letectví.....	16
3.3 Termočláňkové snímače teploty.....	17
4 Propojení snímače teploty a převodníku.....	20
4.1 Kompenzační vedení pro termočláňky.....	20
4.2 Termočláňkové konektory.....	20
5 Princip měření teploty termočláňky a její vyhodnocení.....	22
5.1 Princip termočláňku.....	22
5.2 Způsoby měření termočláňkového napětí.....	24
5.3 Kompenzace srovnávacího spoje.....	24
6 Návrh a realizace převodníku.....	26
6.1 Obvodové řešení a výběr vhodných komponent.....	26
6.2 Simulace obvodu v NI Circuit Design Suite – NI Multisim.....	28
6.3 Realizace funkčního vzorku.....	29
7 Ověření metrologických parametrů převodníku.....	29
7.1 Popis prováděných měření.....	29

7.2	Kontrola parametrů v rozsahu pracovních teplot převodníku.....	31
7.3	Kontrola parametrů při změně napájecího napětí.....	32
7.4	Kontrola odebíraného proudu převodníkem.....	33
7.5	Kontrola funkce obvodu termočlánku.....	33
7.6	Kontrola funkce převodníku při vstupních teplotách do 1200 °C.....	33
7.7	Použité měřicí přístroje a zařízení.....	34
7.8	Výsledky měření.....	34
7.8.1	Kontroly parametrů v rozsahu pracovních teplot převodníku.....	34
7.8.2	Kontroly parametrů při změně napájecího napětí.....	35
7.8.3	Kontroly odebíraného proudu převodníkem.....	35
7.8.4	Kontroly funkce obvodu termočlánku.....	35
7.8.5	Kontroly funkce převodníku při vstupních teplotách do 1200 °C.....	35
8	Závěr.....	37
9	Literatura.....	38

1 Úvod

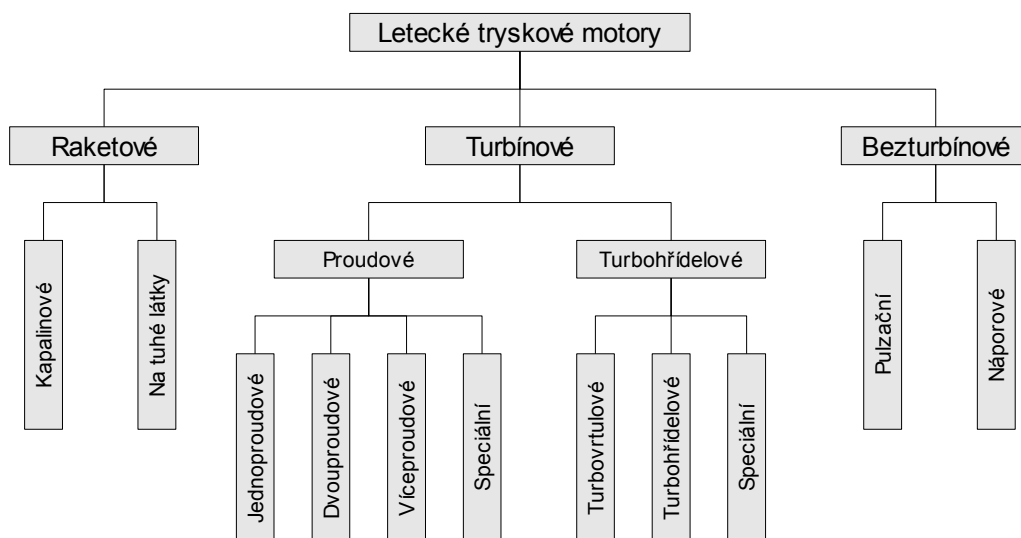
Tématem této práce je způsob měření teploty výfukových plynů u proudových motorů. Stručně je zde popsáno základní rozdělení leteckých tryskových motorů a popis funkce proudových a turbohřídelových motorů. Je zde charakterizováno prostředí, zejména pracovní teploty vlastního snímače teploty, kompenzačního vedení a elektronického převodníku teploty na napětí. Dále je proveden průzkum trhu těchto snímačů teploty, kompenzačních vedení a příslušenství k těmto snímačům. Cílem práce je výběr vhodného snímacího elementu, návrh elektronického převodníku teplota/napětí, jeho realizace a ověření metrologických parametrů převodníku.

Navrhovaný měřicí řetězec by měl mít rozsah měřených teplot od $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ až do $+950\text{ }^{\circ}\text{C}$. Rozsah pracovních teplot převodníku je zadavatelem stanoven v rozmezí od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Napěťový výstup z převodníku, který je požadován od 0 do 3 V, bude dále zpracováván v řídicí jednotce motoru. Dalším požadavkem zadavatele je, aby elektronický převodník byl napájen stejnosměrným napětím $+5\text{ V}$ a plným napájecím napětím na výstupu bylo indikováno přerušení obvodu termočlánku. Externí zadavatel fa PBS Velká Bíteš, divize letecké techniky, která se zabývá výrobou pomocných energetických jednotek na bázi spalovacích turbín pro letouny, vrtulníky a výrobou malých proudových motorů, tento převodník využije pro svoje proudové motory.

2 Turbínové motory

2.1 Rozdělení turbínových motorů

Turbínové motory patří do skupiny motorů zvaných letecké tryskové motory. Jak už název vypovídá, jsou letecké tryskové motory primárně určeny pro pohon letadel. Využití mají i v jiných odvětvích letectví jako jsou pohony raket nebo pohony generátorů různých pozemních zdrojů energie. Letecké tryskové motory pracují na principu přeměny tepelné energie paliva v kinetickou energii, která je buď přímo využívána na tah motoru a nebo pomocí turbíny a vrtule nebo dalšího kompresoru měněna na tah. Přehledné rozdělení leteckých tryskových motorů je na obr.1.

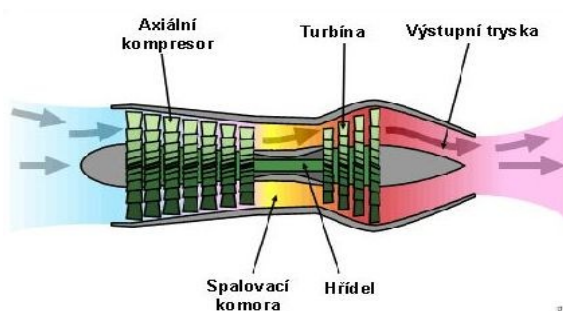


Obr. 1: Rozdělení leteckých tryskových motorů [6]

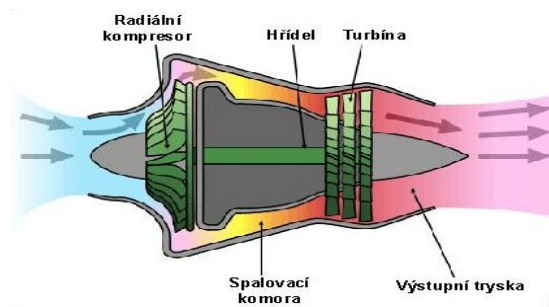
Pro tuto práci jsou důležité proudové motory, případně turbohřídelové motory, které jsou principem činnosti podobné proudovým motorům. Dále zde tedy budou popsány jen základní typy proudových a turbohřídelových motorů. Mezi základní typy proudových motorů patří jednoproudové motory s radiálním nebo axiálním kompresorem a dvouproudové motory s celkovým obtokem nebo částečným předním obtokem. Mezi základní typy turbohřídelových motorů patří turbovrtulové motory a turbohřídelové motory. Tyto typy motorů jsou nejpoužívanější pro pohon vojenských a civilních letadel a vrtulníků. [6]

2.1.1 Jednoprúdové motory s axiálním nebo radiálním kompresorem

Na obr.2 a obr.3 je uvedeno schéma a popis základních částí jednoprúdového motoru s axiálním nebo radiálním kompresorem. Jednoprúdové motory patří k nejjednodušším turbínovým motorům. Pracují na principu Braytonova tepelného oběhu. Tento tepelný cyklus je znázorněn pomocí p-V diagramu na obr.4. Fáze 1→2 představuje adiabatickou kompresi, fáze 2→3 představuje isobarické spalování, fáze 3→4 představuje adiabatickou expanzi a fáze 4→1 představuje isobarický výfuk.

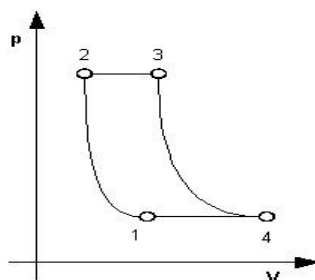


Obr. 2: Jednoprúdový motor s axiálním kompresorem [19]



Obr. 3: Jednoprúdový motor s radiálním kompresorem [20]

Na zemi i za letu je vzduch nasáván přes vstupní část do radiálního nebo axiálního kompresoru, kde je stlačován. Při stlačování nasávaného vzduchu dochází k jeho ohřívání. Takto stlačený vzduch vstupuje do spalovací komory. Do spalovací komory je vstřikováno letecké palivo, nejčastěji kerosin. Ve spalovací komoře vlivem spalování paliva za stálého tlaku roste teplota a tedy i tepelná energie plynů. Plyn ze spalovací komory vstupuje do turbíny a roztáčí ji. Turbína pomocí společného hřídele roztáčí kompresor. Tlak plynů za turbínou je daleko větší než tlak vzduchu v okolní atmosféře a proto plyn z turbíny je veden do výstupní trysky, kde se jeho tepelná a tlaková energie mění v rychlost. Rychlost plynu z trysky vyvozuje tah. [6]

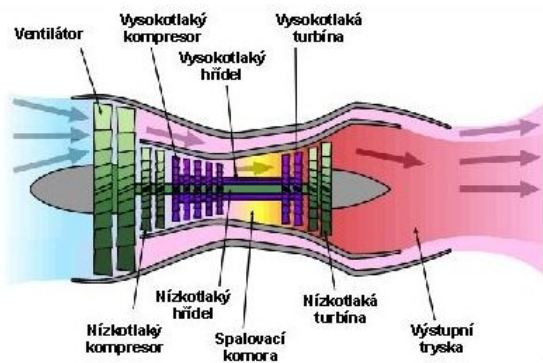


Obr. 4: p - V diagram Braytonova cyklu [6]

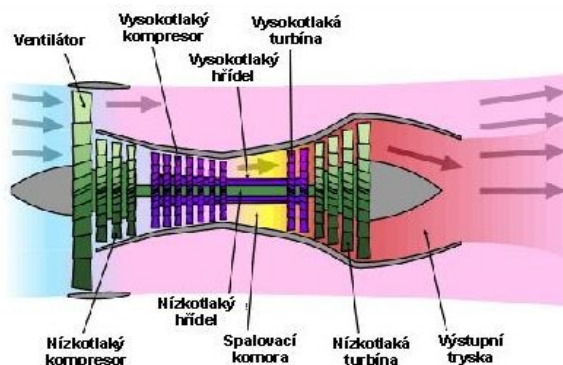
Z obr.2 a obr.3 je patrné, že motory mohou mít vícestupňovou turbínu. V případě motoru s axiálním kompresorem může být i kompresor vícestupňový. Nejjednodušší motor má jednostupňový kompresor a jednostupňovou turbínu. Tyto typy motorů jsou vhodné pro nadzvuková letadla pro velké výšky a rychlosti.

2.1.2 Dvouproudové motory s celkovým nebo částečným předním obtokem

Dvouproudové motory jsou kombinací motoru turbovrtulového a motoru jednoproudového. U tohoto motoru hnací turbína nepohání vrtuli, ale kompresor, který stlačuje vzduch a ten expanduje ve vnější výstupní trysce, vytváří tah motoru vnější výstupní tryskou. Někdy se používá místo označení kompresor ventilátor nebo dmychadlo. Tepelná a tlaková energie plynů za hnací turbínou (nízkotlakou) je ve vnitřní výstupní trysce měněna na rychlost a vyvozuje tah motoru vnitřní výstupní tryskou. Celkový tah motoru je pak dán součtem tahů vnitřního a vnějšího proudu. Na obr.5 a obr.6 jsou znázorněna schémata a základní části dvouproudového motoru s celkovým obtokem a dvouproudového motoru s částečným předním obtokem. [6]



Obr. 5: Dvouproudový motor s celkovým obtokem [21]

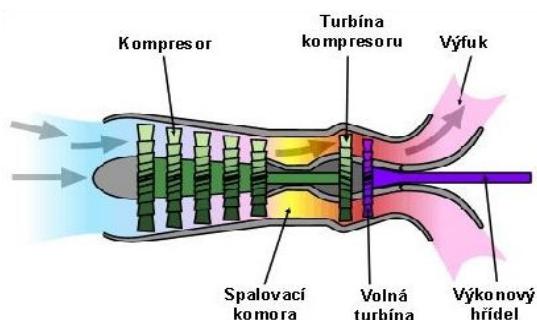


Obr. 6: Dvouproudový motor s částečným předním obtokem [22]

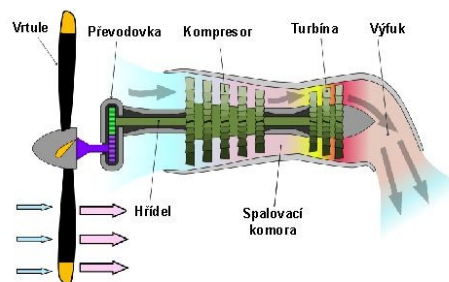
Přes dvouproudový motor proudí více vzduchu, tím je rychlost výstupních plynů nižší než u motorů jedнопroudových. Proto jsou dvouproudové motory méně hlučné a mají nižší spotřebu. To je také důvod, proč jsou dnes téměř všechna dopravní letadla vybavena tímto typem motoru. Pro zvýšení tahu mohou být tyto motory vybaveny systémem přídavného spalování. To se ale spíše týká motorů určených pro vojenské letouny. Systém přídavného spalování nemůže být používán trvale, užívá se pro krátkodobé zvýšení tahu motoru. [6]

2.1.3 Turbohřídelové a turbovrtulové motory

Tyto motory pracují také na principu Braytonova tepelného oběhu. Jejich princip činnosti je podobný jako u jedнопroudového motoru. Vzduch vstupuje vstupní částí do kompresoru, kde je stlačen a přiveden do spalovací komory. Ve spalovací komoře po smísení s palivem hoří. Vzniklé plyny jsou vedeny na turbínu, která společnou hřídel pohání kompresor. Do tohoto bodu je tepelný oběh turbohřídelových motorů shodný s motory jedнопroudovými. V turbohřídelových motorech je však za turbínou kompresoru další turbína tzv. volná turbína, kde se část tepelné a tlakové energie plynů přemění ve výkon a ten je zužitkován pro pohon hřídele. [6] Turbohřídelový motor je na obr.7. Tento typ motoru je používán ve vrtulnicích. Výkonový hřídel je veden do reduktoru, který snižuje počet otáček tak, aby byly vhodné pro pohon listů rotoru vrtulníku. Pokud bychom místo reduktoru použili převodovku a vrtuli, dostaneme turbovrtulový motor. Uspořádání turbovrtulových motorů jsou různá. Motor může být jednorotorový s převodovkou a tažnou vrtulí, tak jak je ukázáno na obr.8. Nebo s volnou turbínou, jako na obr.7, dvourotorový s převodovkou a tlačnou vrtulí. Tyto typy motorů jsou pro nižší rychlosti letu, pro vyšší rychlosti nejsou vhodné, protože vrtule má nízkou účinnost při vysokých rychlostech.



Obr. 7: Turbohřídelový motor [23]



Obr. 8: Turbovrtulový motor [24]

2.2 Teploty turbínových motorů

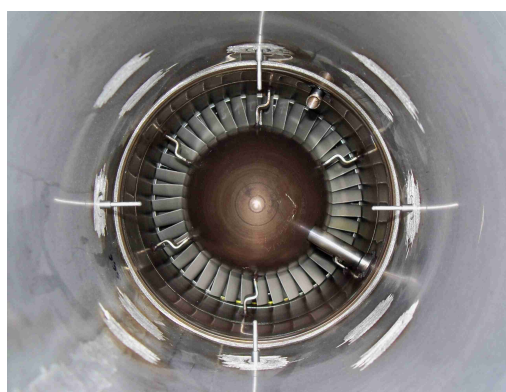
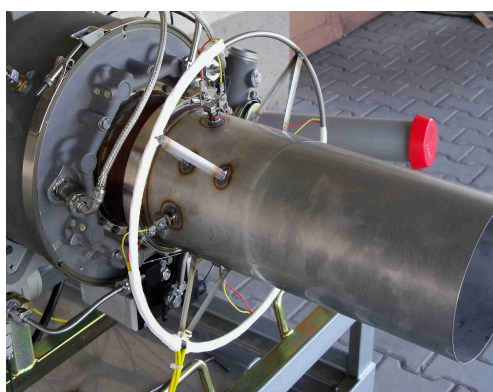
2.2.1 Rozložení teplot na proudovém motoru

V předchozí kapitole byly popsány základní principy a části proudových motorů. Protože jsou to tepelné stroje, u kterých dochází ke spalování paliva, jsou teploty plynů, jednotlivých kovových částí, pláště a okolí stroje poměrně vysoké. Pro názornost bude uvažován motor s jedním radiálním kompresorem a jedním turbínovým stupněm. Teplota nasávaného vzduchu kompresorem je vlastně teplotou okolního vzduchu, může být přibližně v rozmezí $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$, záleží na klimatických podmínkách, ve kterých je motor provozován. Po stlačení vzduchu za kompresorem dojde k jeho ohřátí. Teplota vzduchu v této části motoru bývá $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+400\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dále takto ohřátý vzduch postupuje do spalovací komory, kde po smíchání se vstřikovaným palivem hoří. Teplota plamene bývá $+1700\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+1900\text{ }^{\circ}\text{C}$. Odcházející spaliny ze spalovací komory mají teplotu $+800\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+900\text{ }^{\circ}\text{C}$. Horké plyny pak dále postupují přes rozváděcí lopatky a lopatky rotujícího turbínového kola do výstupní trysky. Teplota rozváděcích lopatek bývá $+700\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+800\text{ }^{\circ}\text{C}$, teplota lopatek rotující turbíny bývá $+500\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+600\text{ }^{\circ}\text{C}$, teplota plynů ve výstupní trysce bývá $+500\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+700\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kromě teplot uvnitř motoru jsou pro nás důležité i teploty pláště a okolí motoru. Plášť motoru může mít teplotu $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Záleží kterou část motoru plášť překrývá. V oblasti vstupní části a kompresoru jsou teploty pláště nižší, přibližně do $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$. V oblasti spalovací komory a výstupní trysky mohou teploty pláště dosahovat až $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$. [2]

2.2.2 Výfukové plyny a měření jejich teploty

Teplota výfukových plynů je jeden z důležitých parametrů motoru. Je využívána řídicí jednotkou motoru pro řízení chodu motoru a pro ochranu motoru při překročení mezních teplot výfukových plynů. Překročením těchto teplot by mohlo dojít k poškození motoru. U vysokou teplotou namáhaných částí, jako jsou rozváděcí lopatky a lopatky rotujícího turbínového kola, by mohlo dojít k jejich poškození nebo úplnému odlomení. V krajním případě i destrukci celého motoru. Teploty plynů za turbínou mohou dosáhnout až $+700\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při přechodových stavech, jako je start motoru, až $+900\text{ }^{\circ}\text{C}$. Měření takto vysokých teplot je problematické. Snímače teploty výfukových plynů jsou namáhány nejen vysokou teplotou, ale i mechanicky vysokou rychlostí proudících plynů a vibracemi motoru.

Teplota plynů v celém průřezu výstupní trysky není stejná. Protože vstřikování paliva a jeho hoření ve spalovací komoře není úplně homogenní, také teploty výstupních plynů nejsou ve všech místech stejné. Na rozložení teplot výstupních plynů má vliv i proudění vzduchu za kompresorem. Při vývoji motorů a jejich zkouškách se měří teplotní pole výfukových plynů. To je prováděno tak, že po obvodu výstupní trysky je rovnoměrně rozmístěno více snímačů teploty, například 4, 8 nebo 12 snímačů. Na obr.9 je ukázáno rozmístění čtyř snímačů při měření teplotního pole motoru. V měřicí ústředně jsou potom zaznamenávány všechny čtyři teploty. Jejich zprůměrováním dostaneme střední teplotu výfukových plynů. Pro měření teplot výstupních plynů za provozu motoru postačí méně snímačů. Většinou jsou to termočláňkové snímače, které jsou zapojeny paralelně. U menších motorů postačí jeden snímač teploty.



Obr. 9: Rozmístění čtyř snímačů teploty výfukových plynů na výfukové rouře

3 Snímače teploty

3.1 Vhodné typy snímačů teploty

Vzhledem k rozsahu měřené teploty a prostředí, ve kterém bude snímač pracovat, je výběr vhodných metod měření a typů snímačů velmi omezený. Měřená teplota je v rozsahu od $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+950\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pracovní část snímače by měla být schopna trvale pracovat při teplotě nejméně $+1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dalším požadavkem je, aby část snímače, která bude umístěna v proudu horkých plynů, byla dostatečně mechanicky tuhá a odolná vůči korozi. Část snímače umístěná mimo výstupní trysku, to znamená v jejím okolí a okolí horkých částí motoru, by měla mít teplotní odolnost minimálně $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$, spíše do $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Požadavkům na rozsah měřených teplot nejlépe vyhovují termoelektrické snímače teploty. Polovodičové a odporové snímače teploty neumožňují měřit takto vysoké teploty. Dalším požadavkem je konstrukční řešení snímače. Konstrukcí snímače je nutné zajistit, aby měřicí část byla dobře chráněna před proudem horkých plynů.

3.2 Speciální snímače používané v letectví

Pro účely měření teploty výfukových plynů proudových motorů se vyrábějí speciální snímače. Jedním z výrobců těchto snímačů je fa Mesit přístroje spol. s r.o. V její nabídce jsou tři typy takových snímačů, viz obr.10. Pro proudové motory je to termoelektrický vysílač teploty LUN 1371 a dvojitý termoelektrický vysílač teploty LUN 1374. Pro turbovrtulové motory je to termoelektrický vysílač teploty LUN 1377. Měřicí rozsah vysílačů LUN 1371 a LUN1377 je $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+900\text{ }^{\circ}\text{C}$. Měřicí rozsah vysílače LUN 1374 je $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+900\text{ }^{\circ}\text{C}$. [15]



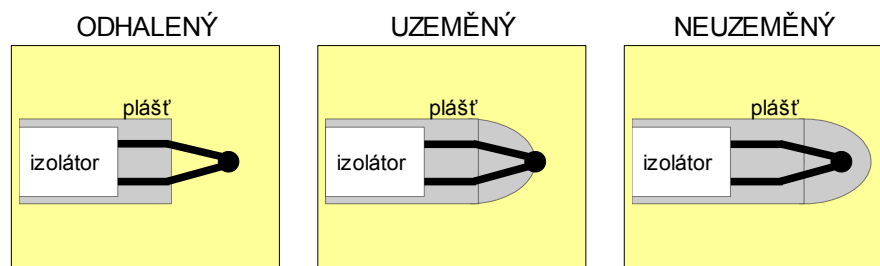
Obr. 10: Snímače teploty fy Mesit přístroje (zleva LUN1371, LUN1374 a LUN1377) [15]

3.3 Termočláňkové snímače teploty

Jak již bylo dříve uvedeno, pro měření takto vysokých teplot jsou vhodné termočláňkové snímače. Vzhledem k rozsahu měřených teplot je vhodný pouze termočláňek typu K, který je také jedním z nejpoužívanějších typů termočláňků v průmyslu. Měřicí rozsah termočláňku typu K je $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, krátkodobě až $+1300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Konstrukčně jsou snímače řešeny jako plášťové, kde uvnitř pláště jsou vedeny dráty z příslušných termočláňkových dvojic. Na konci, v místě měření teploty, jsou dráty svařené. Dráty jsou od pláště izolovány, většinou keramickým práškem. [1]

Na obr.11 jsou uvedeny možné způsoby provedení měřicích konců termočláňkových snímačů. Odhalený měřicí konec se používá pro měření plynů, má velmi rychlou odezvu, je nevhodný pro měření kapalin, kvůli možné kontaminaci. Pro měření teploty výfukových plynů je však nevhodný, protože vysokými teplotami by mohlo dojít k upálení měřicích konců nebo vlivem agresivního korozivního prostředí k jejich poškození. Uzeměný měřicí konec má rychlejší odezvu než neuzeměný, je však náchylnější k rušení. Jako nejvhodnější se jeví neuzeměný měřicí konec. Je odolný proti rušení a zajišťuje dostatečnou ochranu proti proudu horkých plynů. Jeho nevýhodou je pomalejší odezva. [2]

Plášť termočláňkových snímačů je tvořen trubicí z odolného materiálu. Pro takto vysoké teploty a agresivní prostředí se většinou používá Inconel 600 nebo nerezová ocel s označením „310 Stainless Steel“. Teplotní odolnost Inconelu 600 a nerezové oceli 310 je až $+1150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jsou však i speciální materiály jako je Hastelloy X a SUPER XL, které uvádí ve své nabídce fa Omega Engineering, jejichž trvalá maximální teplota je $+1200\text{ }^{\circ}\text{C}$. [7]



Obr. 11: Provedení měřicích konců termočláňkových snímačů [2]

Vhodný snímač pro tuto konkrétní zástavbu na motoru by měl mít tyto parametry:

- 1) délka snímače 100 až 200 mm
- 2) průměr měřicí sondy 1,5 mm
- 3) neuzeměné provedení měřicího konce
- 4) rozsah měřených teplot -50 °C až +950 °C
- 5) ukončení konektorem nebo vývodkou
- 6) teplotní odolnost konektoru nebo vývodky do +150 °C
- 7) materiál pláště Inconel 600 nebo 310 Stainless Steel

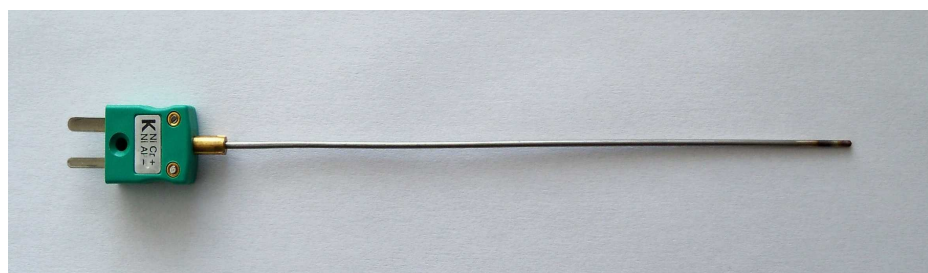
Protože součástí zadání je i návrh vhodného měřicího elementu a průzkum trhu těchto snímačů, jsou zde dále uvedeny termoelektrické snímače různých výrobců a dodavatelů. Pro přehlednost jsou vhodné snímače zpracovány do tabulky 1.

Výrobce většinou umožňuje libovolně zvolit délku sondy a provedení ukončení dle potřeb zákazníka. Snímače mohou mít vývody ukončeny konektorem, který má kontakty z příslušných termočláňkových materiálů, nebo jsou vývody provedeny vývodkou. Vedení je potom provedeno buď pokračujícími termočláňkovými dráty, nebo může být ve vývodce napojeno kompenzační vedení. U velmi dlouhých vývodů, řádově jednotky až desítky metrů je s ohledem na cenu vhodnější volit kompenzační vedení.

Tabulka 1: Přehled vhodných termoelektrických snímačů teploty [11 – 14], [16 - 18]

Výrobce nebo dodavatel	Označení	Typ	Měřicí rozsah	Pracovní teplota přechodky	Materiál pláště	Délka sondy	Průměr sondy	Ukončení vývodu
APO Elmos	MTC 10-E1/150/3	K	-200°C až +1150°C	Do +200°C	Inconel 600	150mm	1,5mm	konektor
APO Elmos	MTC 11-E1/150/500/1	K	-200°C až +1150°C	Do +250°C	Inconel 600	150mm	1,5mm	vývodka
GHM Greisinger	GTT 15150	K	-220°C až +1150°C	Do +200°C	Inconel 600	145mm	1,5mm	konektor
GHM Greisinger	GTF101-5/15150	K	-220°C až +1150°C	Do +200°C	Inconel 600	130mm	1,5mm	vývodka
GHM Greisinger	GTF101-5/15250	K	-220°C až +1150°C	Do +200°C	Inconel 600	230mm	1,5mm	vývodka
JUMO s.r.o.	901221/20-1043-1,5-200	K	-200°C až +1200°C	Do +260°C	Inconel 2.4816	200mm	1,5mm	konektor
JUMO s.r.o.	901221/33-1043-1,5-200-03/1000	K	-200°C až +1200°C	Do +260°C	Inconel 2.4816	200mm	1,5mm	vývodka
Labfacility	MD-ISK-S15-150-P5	K	-100°C až +1100°C	Do +200°C	310 stain. steel	150mm	1,5mm	vývodka
Labfacility	MA-ISK-S15-150-P1-2.0-C2-T	K	-100°C až +1100°C	Do +200°C	310 stain. steel	150mm	1,5mm	vývodka
Labfacility	MB-ISK-S15-150-SP	K	-100°C až +1100°C	Do +220°C	310 stain. steel	150mm	1,5mm	konektor
Labfacility	MB-ISK-S15-150-MP	K	-100°C až +1100°C	Do +220°C	310 stain. steel	150mm	1,5mm	konektor
Labfacility	XF-341-FAR	K	-40°C až +1100°C	Do +220°C	310 stain. steel	150mm	1,5mm	konektor
Omega Engineering	HKMTIN-062U-6	K	-200°C až +1150°C	Do +260°C	Inconel	150mm	1,5mm	vývodka
Omega Engineering	KMTXL-062U-6	K	-200°C až +1150°C	Do +260°C	Inconel	150mm	1,6mm	vývodka
Omega Engineering	KMQXL-062U-6	K	-200°C až +1335°C	Do +220°C	Inconel	150mm	1,6mm	konektor
Omega Engineering	HKMQIN-062U-6	K	-200°C až +1150°C	Do +260°C	Inconel	150mm	1,6mm	konektor
Qtest	GTT 1150 OK	K	-200°C až +1150°C	Do +200°C	Inconel	130mm	1,6mm	konektor
Watlow GmbH	ACEF00Q060UK000	K	0°C až +1200°C	Do +200°C	Inconel 600	152mm	1,6mm	konektor
Watlow GmbH	AFED0TQ060UK030	K	0°C až +1200°C	Do +200°C	Inconel 600	152mm	1,6mm	vývodka
ZPA Nová Paka	312 F15KJ220M/150	K	0°C až +1150°C	Do +150°C	Inconel 600	150mm	1,5mm	konektor
ZPA Nová Paka	312 C15KJ22T0/150	K	0°C až +1150°C	Do +150°C	Inconel 600	150mm	1,5mm	vývodka

Jako vhodný snímací element byl vybrán snímač od fy Labfacility typ XF-341-FAR. Snímač byl zakoupen u fy Farnell. Jeho cena byla 455,- Kč. Snímač je ukončen miniaturním termočlávkovým konektorem s plochými vývody. Výhoda ukončení konektorem je zřejmá z obr.12. V konektoru je vytvořen otvor pro šroub, takže celý konektor i s pláštěm snímače je potom dobře mechanicky fixován. Při ukončení vývodkou je nutné zajistit upevnění jiným způsobem, například objímkou. Cena snímače s konektorem a snímače ukončeného vývodkou se většinou neliší.



Obr. 12: Termoelektrický snímač teploty Labfacility typ XF-341-FAR

4 Propojení snímače teploty a převodníku

4.1 Kompenzační vedení pro termočlánky

Kompenzační (prodlužovací) vedení je určeno ke spojení čidla (měřicího spoje) se srovnávacím spojem nebo s místem zpracování informace. Jeho funkcí je prodloužení termoelektrického článku náhradními vodiči, které jsou z levnějších materiálů než vlastní termočlánek. Vlastnosti těchto náhradních materiálů musí mít v rozsahu svých pracovních teplot stejné termoelektrické vlastnosti jako měřicí termočlánek. Většinou je to do teploty $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$. [1]

Tyto vedení jsou vyráběny jako tvrdé dráty pro pevná uložení nebo jako laněné vodiče pro pohyblivá uložení. Každý vodič má vlastní izolaci. Vodiče mohou být volně stočeny navzájem bez další vnější izolace, nebo je použita i vnější izolace, která má podobné vlastnosti jako izolace jednotlivých drátů. Jako materiál izolací se používá PVC, pro teplotně nenamáhané propojení, jehož teplotní odolnost je do $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dále silikonové izolace s teplotní odolností do $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$ a teflonové izolace s odolností do $+260\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pro ještě vyšší teploty mohou být izolace tvořeny speciálními materiály na bázi skelných vláken. [7]

Důležitým prvkem je odolnost proti rušení. Ta se zajišťuje pomocí stínícího opletení. Stínící opletení je buď holé měděné pocínované nebo ocelové a chrání vedení i před mechanickým poškozením nebo je provedena i izolace opletení. Kompenzační vedení se vyrábějí jako stíněná a nestíněná.

Pro funkční vzorek bylo použito kompenzační vedení fy Alcatel typ ET 123334/2xAWG20, CH-A. Jedná se o kroucené stíněné dvouvodičové vedení s teflonovou izolací vodičů i stínícího opletení.

4.2 Termočláňkové konektory

Dalším spojovacím prvkem jsou termočláňkové konektory. Jsou to konektory jejichž kontakty jsou vyrobeny z termočláňkových materiálů nebo jejich náhrad. Provedení kontaktů je kruhového průřezu nebo jsou ploché. Rozdílným průřezem nebo šířkou jednotlivých kontaktů se zamezí přepólování. Uchycení vodičů je provedeno svorkou a šroubkem. Samotné tělo konektoru je většinou vyrobeno z polymeru nebo keramiky. Odolnost konektorů z

polymeru je do $+260\text{ }^{\circ}\text{C}$, odolnost keramických konektorů je až $+650\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pro normální teploty může být tělo konektoru vyrobeno z běžných plastů. Výhodou použití těchto konektorů je, že nevznikají žádné srovnávací spoje a není třeba takového spojení kompenzovat. Konektory jsou provedeny jako zásuvky nebo zástrčky a jako kabelové, panelové nebo do desek plošných spojů. Dále mohou být dvou nebo tří pinové. Třetí kontakt je měděný a používá se pro připojení stínění. Na obr.13 jsou některé kabelové termočláňkové konektory fy Omega Engineering. [7]



Obr. 13: Termočláňkové konektory fy Omega Engineering

Pro propojení kompenzačního vedení a snímače teploty byl použit vysokoteplotní miniaturní konektor typ HMPW-K-F od fy Omega Engineering. Cena konektoru je 70,- Kč. Teplotní odolnost konektoru je do $260\text{ }^{\circ}\text{C}$.

5 Princip měření teploty termočláanky a její vyhodnocení

5.1 Princip termočláanky

Termočláankové snímače teploty pracují na principu Seebeckova jevu. Jestliže mají dva spoje dvou kovů, které tvoří termočláanek, rozdílnou teplotu, jsou i kontaktní napětí obou rozhraní různá. Proto výsledné napětí měřené mezi těmito rozhraními je nenulové a termočláanek lze využít jako zdroj elektrického napětí. Obvodem prochází elektrický proud a nastává Seebeckův jev. V neuzavřeném obvodu lze mezi oběma spoji dvou kovů naměřit termoelektrické napětí, které je dáno rozdílem kontaktních napětí vznikajících na obou spojích daných kovů. Termočláanky jsou tedy generátorová čidla. Termoelektrické napětí je pro většinu dvojic kovů velmi malé. [1]

Vzniklé napětí je v řádu několika mikrovoltů na stupeň Celsia. Například pro termočláanek typu K, jenž je tvořen dvojicí kovů niklchrom – niklhlíník, je to přibližně 41 μV na 1 $^{\circ}\text{C}$. Tato hodnota je Seebeckův koeficient pro termočláanek typu K. Obecně se označuje α . Protože termočláanky nejsou lineární, jsou hodnoty koeficientů α teplotně závislé. Linearizaci a přesný výpočet teploty z měřeného napětí se provádí podle vztahu (1):

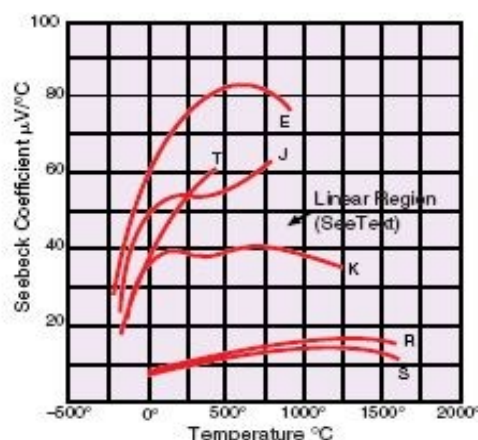
$$t = \alpha_0 + \alpha_1 U + \alpha_2 U^2 + \dots + \alpha_n U^n \quad (^{\circ}\text{C}) \quad (1)$$

kde je t teplota ve ($^{\circ}\text{C}$),

U termonapětí (V),

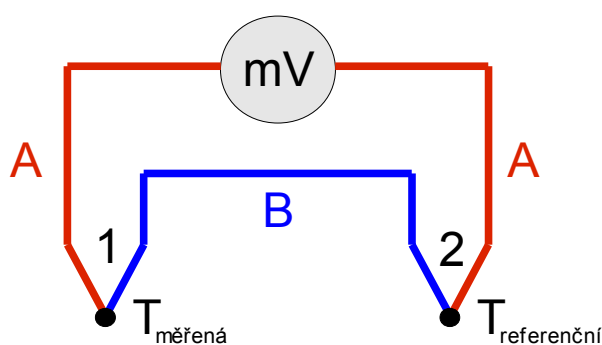
α koeficienty polynomu pro daný typ termočláanky.

Pro termočláanek typu K je to polynom osmého řádu. V praxi se používá polynom třetího řádu, který zajišťuje dostatečnou přesnost. Z obr.14 je dobře patrná teplotní závislost Seebeckova koeficientu pro různé typy termočláanků. [7]



Obr. 14: Teplotní závislost Seebeckova koeficientu pro různé typy termočlánků [25]

Navíc se z dodané tepelné energie přemění na elektrickou energii jen asi 1 % - 3 %. Proto se termočlánky příliš nehodí jako zdroje elektrického napětí, ale spíše pro měření teploty. Princip termočlánku je ukázán na obr.15. Obvod je tvořen dvěma materiály A a B spojenými v místech 1 a 2. Jeden z bodů tvoří měřicí spoj, v našem případě spoj v místě 1 a druhý tvoří srovnávací spoj. [2]



Obr. 15: Princip měření termočlánkem [3]

Pro správnou funkci čidla je nutné, aby teplota srovnávacího spoje v místě 2 byla konstantní a známá. To lze zajistit například použitím termostatu, který se vyrábí i sériově. Vztažná teplota bývá +50 °C nebo +70 °C. Pro měření teplot od 0 °C se používají termostaty

se vztažnou teplotou $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Parazitní vliv termoelektrického napětí na svorkách milivoltmetru je kompenzován, protože na obou svorkách vzniká stejné parazitní termoelektrické napětí, ale opačné polarity, takže jejich součet je 0 mV . [1]

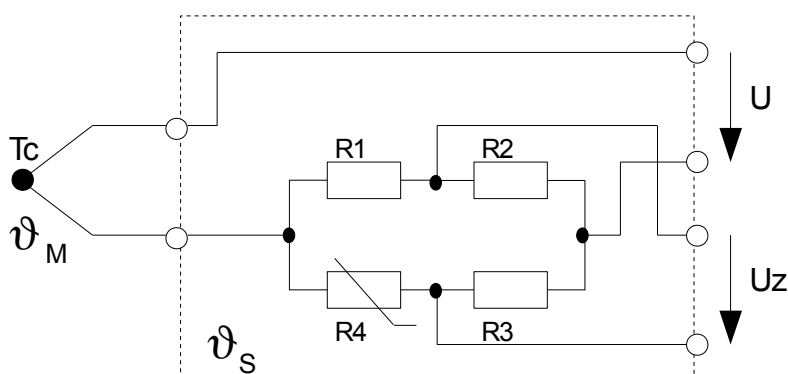
5.2 Způsoby měření termočlánekového napětí

Jak již bylo řečeno, výstupní napětí termočláneků je velice malé, řádově jednotky až desítky mikrovoltů. Měření takto malých napětí s poměrně velkou přesností je problematické.

Například termočlánek typu K má v rozsahu teplot od $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+950\text{ }^{\circ}\text{C}$ výstupní napětí od $-1,889\text{ mV}$ do $+39,314\text{ mV}$. To znamená, že pro měřenou teplotu v rozsahu $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ je výstupní napětí přibližně v rozmezí 41 mV . Takto malá napětí můžeme měřit přesnými milivoltmetry, to se však týká spíše laboratorního měření. Pro měření běžnými voltmetry, případně A/D převodníky, je nutno termočlánekové napětí zesílit. K tomuto účelu se dobře hodí integrované přístrojové nebo diferenční zesilovače. Na trhu jsou i speciální obvody, přímo určené pro měření termonapětí, které mají přímo na čipu integrovanou kompenzaci srovnávacího spoje.

5.3 Kompenzace srovnávacího spoje

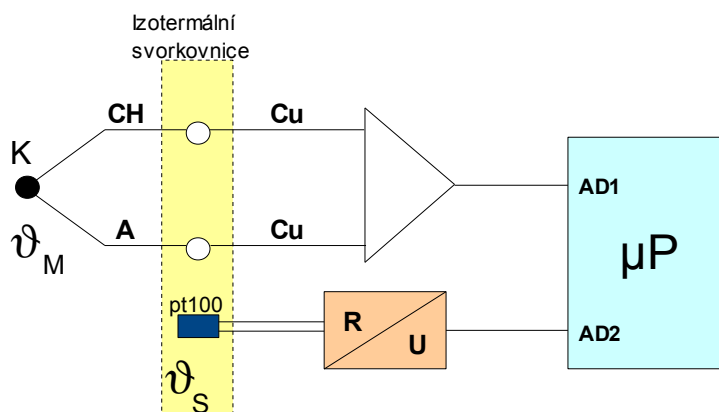
Vliv kolísání teploty srovnávacího spoje lze omezovat pomocí kompenzačních obvodů. Tyto obvody dělíme do dvou skupin na kompenzaci pasivní a aktivní. Pasivní kompenzace se provádí pomocí teplotně závislého odporu, který se vkládá do obvodu termoelektrického čidla. Používají se kovové nebo polovodičové teplotně závislé odpory, které musí mít stejnou teplotu jako srovnávací spoj.



Obr. 16: Kompenzace srovnávacího spoje můstkem [1]

Při aktivní kompenzaci se do obvodu termoelektrického článku přivádí napětí z pomocného zdroje. Toto napětí je úměrné teplotě srovnávacího spoje. Kompenzační obvod může být řešen jako můstek, kde R_1 , R_2 a R_3 jsou teplotně nezávislé rezistory a R_4 je rezistor umístěný v místě srovnávacího spoje, který mění svoji hodnotu s teplotou. Na výstupu můstku je potom potřebné kompenzační napětí. Zapojení takového obvodu je na obr.16. [1]

Dalším způsobem kompenzace je použití sériově vyráběných kompenzačních obvodů. Tyto obvody se vyrábějí v integrovaném provedení. Obvod má více výstupů, pro několik typů termočlánků, takže například pro kompenzaci termočlánků typu K, J, S nebo typu T, můžeme použít stejný typ obvodu. Integrovaný obvod je zdrojem příslušného termonapětí úměrného teplotě okolí obvodu. Toto napětí je potom přičteno k napětí, které generuje měřicí termočlánek. Pokud je napětí z termočlánku zesíleno a měřeno mikroprocesorem pomocí A/D převodníku, je možno provést kompenzaci přímo v mikroprocesoru. Teplota v místě srovnávacího spoje pak bude měřena mikroprocesorem pomocí jiného čidla, například pomocí Pt100, polovodičového přechodu PN nebo nějakého integrovaného snímače teploty. Je nutné, aby kompenzační teplota byla měřena v bezprostřední blízkosti svorek termočlánku. Takovéto provedení svorek nazýváme izotermální svorkovnice. Blokové schéma zapojení izotermální svorkovnice je na obr.17. [3]



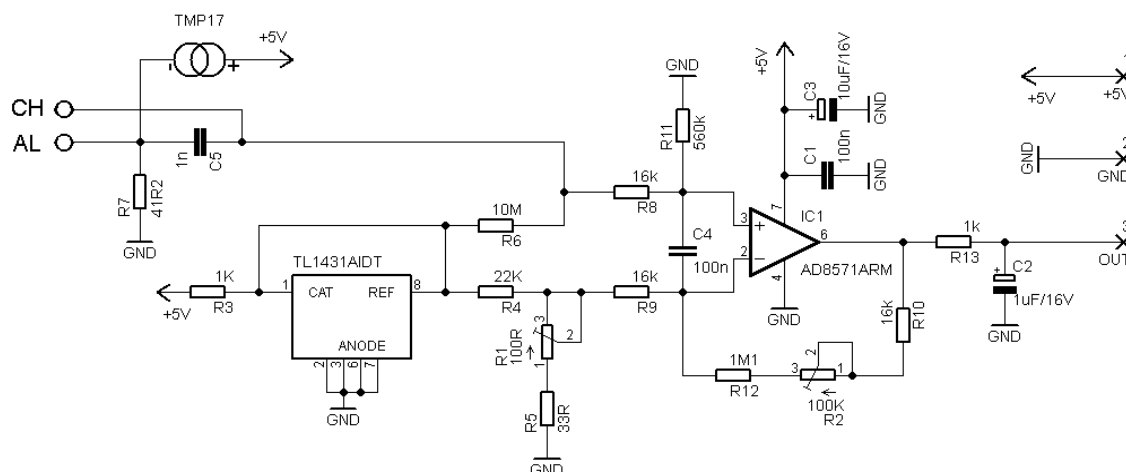
Obr. 17: Kompenzace pomocí izotermální svorkovnice

Při použití prodlužovacího kompenzačního vedení budou do izotermální svorkovnice připojeny vodiče kompenzačního vedení. Funkce kompenzace bude shodná, jako kdyby byly do svorkovnice zapojeny termočlánekové dráty.

6 Návrh a realizace převodníku

6.1 Obvodové řešení a výběr vhodných komponent

Kritériem pro návrh převodníku byla i jednoduchost řešení a cena. Úkolem převodníku bylo řešení teplotní kompenzace srovnávacího spoje a teplotní stability celého obvodu, zajištění požadovaného zesílení a zajištění stability při změně napájecího napětí. Obvodové řešení můžeme rozdělit na tři části. Část zdroje referenčního napětí, kompenzační obvod a napěťový zesilovač. Zjednodušené schéma převodníku je na obr.18. Celkové schéma zapojení převodníku je v příloze 1.



Obr. 18: Zjednodušené schéma převodníku

Jako zdroj referenčního napětí byl použit integrovaný obvod TL1431AIDT v pouzdře SO8. Pracovní teplota obvodu je $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+105\text{ }^{\circ}\text{C}$. Chyba výstupního napětí činí maximálně $\pm 0,25\%$. Obvod je napájen z $+5\text{ V}$ přes předřadný rezistor $1\text{ k}\Omega$. Výstupní napětí reference je $2,5\text{ V}$. Proud referencí je přibližně $2,5\text{ mA}$. Na výstupu referenčního obvodu je zapojen napěťový dělič. Pomocí trimru R1 se nastavuje dolní hranice výstupního napětí převodníku.

Kompenzace srovnávacího spoje byla řešena pomocí snímače teploty TMP17FSZ. Pracovní teplota obvodu je $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+105\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jedná se o zdroj proudu závislý na teplotě. Změna teploty o 1 K vyvolá změnu proudu o $1\text{ }\mu\text{A}$. To znamená, že při $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ protéká obvodem proud $273\text{ }\mu\text{A}$. U termočlánku typu K je závislost napětí na teplotě $41\text{ }\mu\text{V}$ na $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Použitím rezistoru s hodnotou $41\text{ }\Omega$, tak získáme potřebné kompenzační napětí. Použitý rezistor má

hodnotu $41,2 \, \Omega$ s tolerancí 0,1 %. Snímač teploty TMP17FSZ je v pouzdru SO8 a musí být teplotně svázán se svorkami pro připojení kompenzačního vedení. Společně tak vytváří izotermální svorkovnici. [9]

Jako napěťový zesilovač byl použit operační zesilovač AD8571ARZ v pouzdře SO8. Pracovní teplota obvodu je od $-40 \, ^\circ\text{C}$ do $+125 \, ^\circ\text{C}$. Rozsah napájecího napětí je od +2,7 V do +5,5 V. Vstup i výstup zesilovače je typu „rail to rail“. Protože napájecí napětí je nesymetrické a výstupní napětí je požadováno od 0 V do +3 V, je nutné, aby výstup zesilovače byl typu „rail to rail“. Výstupní napětí obvodu AD8571 při nulovém vstupním napětí je maximálně 10 mV, typicky 2 mV. Zesilovač je zapojen jako diferenční zesilovač dle doporučeného zapojení výrobcem. Trimrem R2 se nastavuje zesílení převodníku. [8]

Při vykompenzování srovnávacího spoje bude napětí na rezistoru R7 11,25 mV. Jestliže bude termočlánek měřená teplota $-50 \, ^\circ\text{C}$, čemuž odpovídá termonapětí -1,889 mV, pak napětí na neinvertujícím vstupu operačního zesilovače bude 9,36 mV. Pro nastavení nulové difference na vstupu zesilovače musíme nastavit trimrem R1 na invertujícím vstupu také napětí 9,36 mV. Napětí neinvertujícího i invertujícího vstupu je vztaženo k potenciálu GND. Výstupní offset zesilovače typu „rail to rail“ není kompenzován, vzhledem k jeho velikosti je zanedbán. Při velikosti offsetu 3 mV bude chyba $1 \, ^\circ\text{C}$.

Všechny obvodové součástky byly vybírány s co nejnižším teplotním koeficientem, tím je zajištěna teplotní stabilita převodníku. Tolerance všech rezistorů kromě R7 je 1 %. Rezistor R7 má toleranci 0,1 %. Všechny kondenzátory plní funkci filtrů, jejich tolerance je 20 %.

6.2 Simulace obvodu v NI Circuit Design Suite – NI Multisim

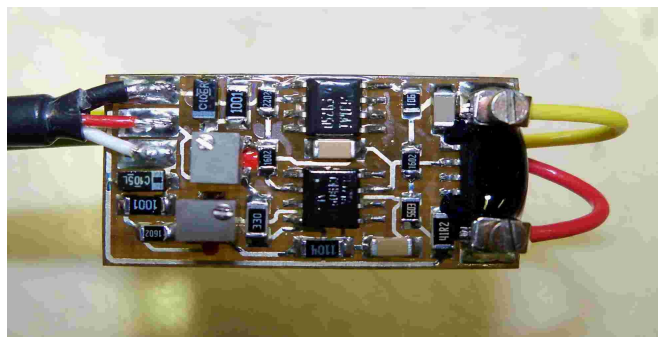
Při návrhu jednotlivých částí a simulaci celého převodníku byl využíván počítačový program NI Multisim, který patří do softwarového balíku programů Circuit Design Suite od National Instruments. Součástí tohoto softwarového balíku programů je i program NI Ultiboard, který je určen pro návrh desek plošných spojů. Program je možno stáhnout z www stránek výrobce a bezplatně používat třicet dní. V příloze 2 je ukázka při simulaci převodníku v jeho prostředí. Měřicí termočlánek byl nahrazen napětíovými zdroji. Výstupní napětí zdrojů odpovídá teplotě uvedené u každého zdroje. Pomocí programu bylo provedeno nastavení převodníku a získána předpokládaná výstupní napětí z převodníku. Vygenerované hodnoty jsou uvedeny v tabulce 2. [10]

Tabulka 2: Hodnoty vygenerované v programu NI Multisim

Vstupní napětí [mV]	Vstupní teplota [°C]	Výstupní napětí [mV]	Výstupní teplota [°C]	Odchylka [°C]
-1,889	-50	14,3	-45,2	4,8
-1,527	-40	40,4	-36,5	3,5
-1,156	-30	67,2	-27,6	2,4
-0,778	-20	94,5	-18,5	1,5
-0,392	-10	122,4	-9,2	0,8
0,000	0	150,7	0,2	0,2
2,023	50	297,1	49,0	-1,0
4,096	100	446,9	99,0	-1,0
6,138	150	594,6	148,2	-1,8
8,138	200	739,2	196,4	-3,6
10,153	250	884,9	245,0	-5,0
12,209	300	1034	294,7	-5,3
14,293	350	1184	344,7	-5,3
16,397	400	1336	395,3	-4,7
18,516	450	1490	446,7	-3,3
20,644	500	1657	502,3	2,3
22,776	550	1798	549,3	-0,7
24,905	600	1952	600,7	0,7
27,025	650	2105	651,7	1,7
29,129	700	2257	702,3	2,3
31,213	750	2419	756,3	6,3
33,275	800	2557	802,3	2,3
35,313	850	2704	851,3	1,3
37,326	900	2850	900,0	0,0
39,314	950	3004	951,3	1,3
41,276	1000	3135	995,0	-5,0
43,211	1050	3275	1041,7	-8,3
45,119	1100	3413	1087,7	-12,3
46,995	1150	3549	1133,0	-17,0
48,838	1200	3682	1177,3	-22,7

6.3 Realizace funkčního vzorku

Funkční vzorek byl realizován na jednostranné desce plošných spojů, viz obr.19. Všechny součástky jsou v provedení SMD. Na desce plošných spojů bylo zajištěno tepelné propojení svorek pro připojení kompenzačního vedení a snímače teploty pomocí teplovodivého lepidla. Po osazení a zapájení součástek byla vyzkoušena funkčnost převodníku a provedeno nastavení pomocí dvou trimrů. Takto osazený a vyzkoušený převodník byl impregnován lakem na osazené plošné spoje.



Obr. 19: Funkční vzorek převodníku

7 Ověření metrologických parametrů převodníku

7.1 Popis prováděných měření

Pro realizaci měření různých parametrů převodníku a zjednodušení měření bylo nutné nahradit termočlánekový snímač teploty vhodným zdrojem termočlánekového napětí. K tomuto účelu byl použit precizní kalibrátor a teploměr Omega model CL521. Tento přístroj je v PBS Velká Bíteš používán kalibrační laboratoří jako etaloní přístroj pro kalibraci odporových a termočlánekových snímačů teploty, měřicích a vyhodnocovacích zařízení pro tyto snímače a kalibraci měřicích ústředěn. Přesnost přístroje ve funkci kalibrátoru termočláneku a napětí je $\pm(0,02 \% \text{ z měřené hodnoty} + 0,6 \mu\text{V})$. Ovládání kalibrátoru je jednoduché, pomocí číselné klávesnice se zadává přímo požadovaná teplota. Výstupem je potom příslušné termočlánekové napětí odpovídající danému typu termočláneku. Kompenzace teploty na svorkách kalibrátoru je zajištěna odporovým teploměrem Pt100. Přístroj je na obr.20.



Obr. 20: Přesný kalibrátor a teploměr Omega model CL521

Výstupní napětí převodníku bylo měřeno multimetrem Schlumberger Solartron 7151. Jedná se o velmi přesný multimetr, který byl nastaven jako stejnosměrný milivoltmetr s rozsahem 0 – 20 V. Přístroj je nutné po zapnutí nechat teplotně ustálit a před každým měřením vyzkratovat vstupní svorky a pomocí tlačítka „null“ vynulovat. Přesnost přístroje je $\pm(0,008 \%$ z měřené hodnoty + 3 digit). Přístroj je na obr. 21.



Obr. 21: Multimetr Schlumberger Solartron 7151

Odebíraný proud převodníkem byl měřen multimetrem UNI-T UT50C. Přesnost multimetru při měření stejnosměrného proudu na rozsahu 0 – 20 mA je $\pm(0,8 \%$ z měřené hodnoty + 1 digit). Kontrola odebíraného proudu má spíše informativní charakter, pro toto měření postačí běžný multimetr. Přístroj je na obr. 22.



Obr. 22: Multimetr UNI-T UT50C

Ověření kompenzace srovnávacího spoje a teplotní stability převodníku bylo prováděno tak, že převodník byl pomocí prodlouženého kompenzačního vedení a přívodního kabelu umístěn do prostředí s příslušnou teplotou okolí. Pro nastavení pracovní teploty převodníku 0 °C, -20 °C a -40 °C bylo použito chladicí zařízení NZ 350/75 (obr.24) a pro nastavení teplot +25 °C, +50 °C a +100 °C byla použita regulovatelná horkovzdušná pec Mora 524 (obr.23).



Obr. 24: Chladicí zařízení NZ 350/75



Obr. 23: Regulovatelná pec Mora 524

Teplota převodníku byla při všech kontrolách měřena teploměrem Voltcraft K102. Jedná se o teploměr pro termočlánek typu K, jeho přesnost je $\pm(0,3 \% \text{ z měřené hodnoty} + 1 \text{ } ^\circ\text{C})$. Měřicí konec termočlánekové sondy teploměru byl umístěn tak, aby byla měřena teplota v místě izotermální svorkovnice převodníku. Přístroj je na obr.25.

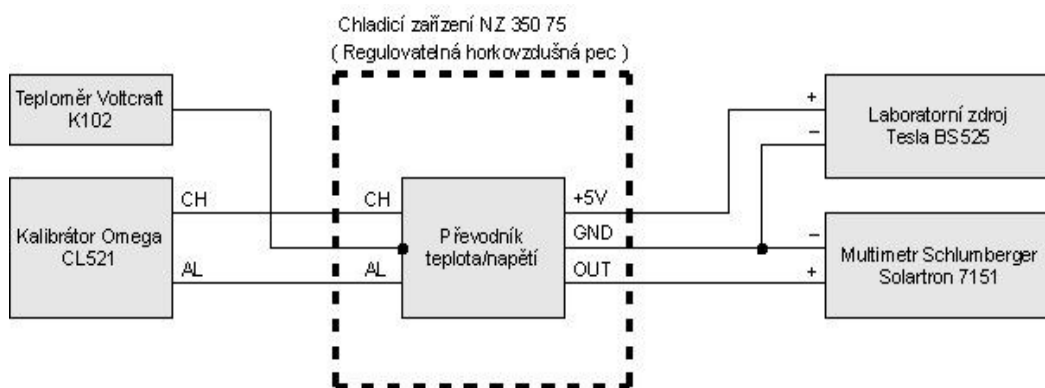


Obr. 25: Teploměr Voltcraft K102

7.2 Kontrola parametrů v rozsahu pracovních teplot převodníku

Měřením byl ověřován rozsah měřených teplot -50 °C až +950 °C v rozsahu pracovních teplot převodníku -40 °C až +100 °C, teplotní stabilita převodníku a funkce kompenzace teploty na izotermální svorkovnici. Převodník byl zahříván nebo chlazen na příslušnou teplotu

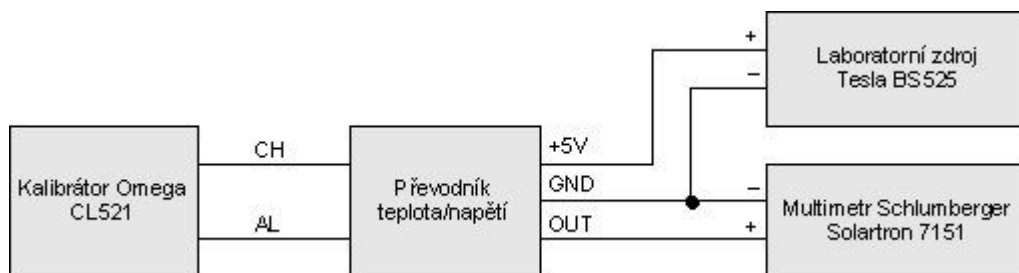
a stabilizován po dobu 0,5 hodiny na této teplotě. Poté byla změřena jeho charakteristika při vstupních teplotách od $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ s krokem $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a od $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+950\text{ }^{\circ}\text{C}$ s krokem $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Měření bylo prováděno dle schéma zapojení na obr.26.



Obr. 26: Schéma zapojení kontroly parametru převodníku v celém rozsahu pracovních teplot

7.3 Kontrola parametru při změně napájecího napětí

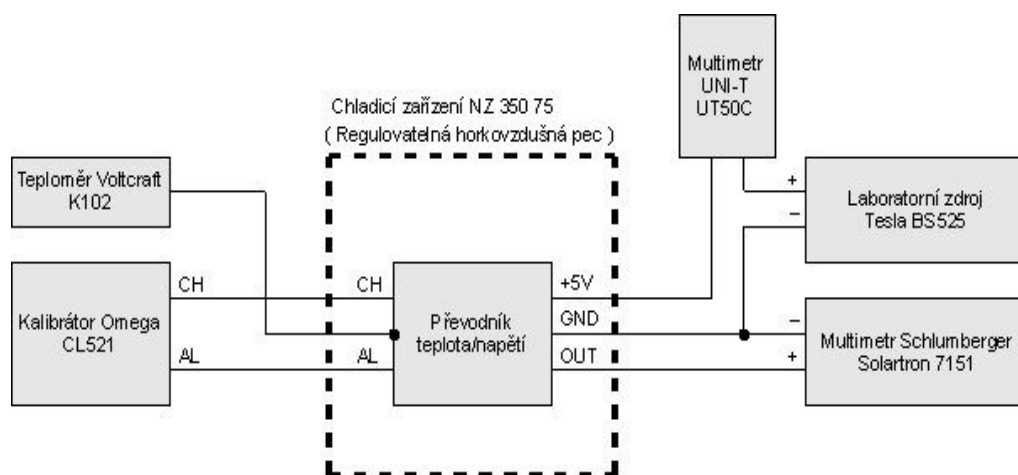
Měřením byla ověřována stabilita výstupního napětí převodníku při konstantní vstupní teplotě a různé velikosti napájecího napětí. Kontrola byla prováděna při teplotě okolí převodníku $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vstupní teplota z kalibrátoru Omega byla nastavena na $+950\text{ }^{\circ}\text{C}$ a multimetrem Schlumberger bylo měřeno výstupní napětí převodníku. Napětí napájecího zdroje Tesla BS525 bylo nastavováno na $4,5\text{ V}$; $5,0\text{ V}$ a $5,5\text{ V}$. Měření bylo prováděno dle schéma zapojení na obr.27.



Obr. 27: Schéma zapojení kontroly parametru při změně napájecího napětí

7.4 Kontrola odebíraného proudu převodníkem

Měřením byl ověřován odebíraný proud převodníku z napájecího zdroje. Měření proudu bylo provedeno při teplotě okolí převodníku $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Napájecí zdroj byl nastaven na $5,0\text{ V}$. Schéma zapojení měření je na obr.28.



Obr. 28: Schéma zapojení kontroly odebíraného proudu převodníkem

7.5 Kontrola funkce obvodu termočláčku

Měřením byla ověřena funkce kontroly obvodu termočláčku. Při přerušení obvodu termočláčku musí být na výstupu převodníku plné napájecí napětí. Zkouška byla provedena tak, že po odpojení jedné svorky kalibrátoru Omega byla měřena změna výstupního napětí převodníku. Kontrola byla prováděna při teplotě okolí převodníku $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Schéma zapojení kontroly je na obr.27.

7.6 Kontrola funkce převodníku při vstupních teplotách do $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$

Kontrolou byla ověřena možnost měřit teploty až do $+1200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kontrola byla prováděna při teplotě okolí převodníku $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kalibrátorem Omega byla nastavována vstupní teplota od $+1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ s krokem $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Multimetrem Schlumberger bylo měřeno výstupní napětí.

7.7 Použité měřicí přístroje a zařízení

- 1) Multimetr Schlumberger Solartron 7151, výr.č. 202816
- 2) Precizní kalibrátor a teploměr Omega model CL521, výr.č. 1197
- 3) Multimetr UNI-T UT50C, výr.č. 1040282520
- 4) Laboratorní zdroj Tesla BS525, výr.č. 018042
- 5) Teploměr Voltcraft K102, výr.č. 030504296
- 6) Chladicí zařízení NZ 350/75, výr.č. 153/89
- 7) Regulovatelná horkovzdušná pec Mora 524, výr.č. neuvedeno

7.8 Výsledky měření

7.8.1 *Kontroly parametrů v rozsahu pracovních teplot převodníku*

Měření bylo provedeno dle popisu v kapitole 7.2 Kontrola parametrů v rozsahu pracovních teplot převodníku. Všechna naměřená data jsou přehledně zpracována do tabulek a grafu, které jsou uvedeny v přílohách 3, 4 a 5. Z naměřených a vypočítaných hodnot vyplývá, že mezní absolutní chyba převodníku Δ_P je v celém rozsahu pracovních teplot 8 °C. Měřicí rozsah je 1000 °C. Relativní chybu převodníku vypočteme podle vztahu (2):

$$\delta_P = \frac{\Delta_P}{X_R} \cdot 100 \quad (\%) \quad (2)$$

kde je Δ_P mezní absolutní chyba převodníku,

X_R měřicí rozsah převodníku.

$$\delta_P = \frac{\Delta_P}{X_R} \cdot 100 = \frac{8}{100} \cdot 100 = 0,8 \quad \%$$

7.8.2 *Kontroly parametrů při změně napájecího napětí*

Napájecí napětí převodníku bylo nastaveno na 4,5 V. Na kalibrátoru Omega byla nastavena teplota +950 °C, výstupní napětí převodníku bylo 2992,3 mV. Poté bylo napájecí napětí převodníku nastaveno na 5,0 V a 5,5 V. Výstupní napětí převodníku bylo při 5,0 V i při 5,5 V 2992,3 mV. Změna napájecího napětí nemá vliv na velikost výstupního napětí převodníku.

7.8.3 *Kontroly odebíraného proudu převodníkem*

Na napájecím zdroji bylo nastaveno napětí 5,0 V. Odebíraný proud převodníkem při okolní teplotě +25 °C byl 3,5 mA. Dále byl měřen odebíraný proud při mezních pracovních teplotách okolí -40 °C a +100 °C. Při teplotě -40 °C byl odebíraný proud 3,8 mA a při teplotě +100 °C byl odebíraný proud 3,4 mA.

7.8.4 *Kontroly funkce obvodu termočlánku*

Na kalibrátoru Omega byla nastavena teplota +950 °C, výstupní napětí bylo 2992,5 mV. Po odpojení jedné svorky kompenzačního vedení převodníku od kalibrátoru Omega bylo výstupní napětí 5008,6 mV, což odpovídá velikosti napájecího napětí. Po přerušení obvodu snímače dojde k okamžité indikaci nastavením plného napájecího napětí na výstupu převodníku.

7.8.5 *Kontroly funkce převodníku při vstupních teplotách do 1200 °C*

Na kalibrátoru Omega byla postupně nastavena teplota +1000 °C až +1200 °C s krokem 50 °C. Výstupní napětí převodníku, vypočítaná výstupní teplota a odchylka je uvedena v tabulce 3. Z hodnot vyplývá, že převodníkem je možné měřit teploty až do +1200 °C. Vlivem větší nelinearity termočlánku typu K v rozmezí hodnot od +950 °C do +1200 °C je mezní absolutní chyba převodníku podstatně větší než v rozsahu od -50 °C do +950 °C. V rozsahu teplot od +950 °C do +1200 °C je mezní absolutní chyba převodníku $\Delta_p = 24,5$ °C. Relativní chyba převodníku $\delta_p = 2$ %.

Tabulka 3: Naměřené hodnoty výstupního napětí v rozsahu vstupních teplot +1000 °C až +1200 °C

Vstupní napětí [mV]	Vstupní teplota [°C]	Výstupní napětí [mV]	Výstupní teplota [°C]	Odchylka [°C]
41,276	1000	3130,8	993,6	-6,4
43,211	1050	3271,1	1040,4	-9,6
45,119	1100	3407,8	1085,9	-14,1
46,995	1150	3543,4	1131,1	-18,9
48,838	1200	3676,6	1175,5	-24,5

8 Závěr

V úvodu této práce byla popsána funkce proudových motorů, teplotní rozsahy prostředí uvnitř jednotlivých částí motorů a v jejich okolí. Jsou zde uvedeny vhodné termočláňkové snímače pro měření teploty výfukových plynů, kompenzační vedení a termočláňkové konektory od různých výrobců, které jsou vhodné pro tato prostředí. Dále bylo navrženo konkrétní propojení snímače teploty a převodníku. V další části byl navržen elektronický převodník teplota/napětí dle zadaných požadavků. Pomocí programu NI Multisim byla funkce převodníku simulována a získány předpokládané hodnoty výstupního napětí při vstupním termočláňkovém napětí. Předpokládaná chyba převodníku byla ± 6 °C v celém rozsahu měřených teplot. Tato chyba je chybou nelinearity termočláňku. V počítačovém programu nebyl simulován vliv okolní teploty převodníku, takže chyba vlivem změny okolní teploty v celém rozsahu pracovních teplot nebyla teoreticky stanovena.

Převodník byl prakticky realizován na desce plošných spojů a dle předem stanoveného postupu byly ověřeny jeho metrologické parametry. V celém rozsahu pracovních a měřených teplot byl převodník plně funkční a jeho chyba byla maximálně ± 8 °C. Dále byla ověřena jeho funkce v rozsahu stanoveného napájecího napětí a funkce kontroly obvodu termočláňkového snímače. Převodník také umožňuje měřit teploty až do +1200 °C. V rozsahu vstupních teplot +950 °C až +1200 °C je jeho chyba podstatně větší, až 24,5 °C, což je způsobeno značnou nelinearitou tohoto typu termočláňku při těchto teplotách.

Převodník je využíván jako součást elektroniky umístěné na novém proudovém motoru vyráběném v PBS Velká Bíteš.

9 Literatura

- [1] BEJČEK, L. *Měření neelektrických veličin*. [s.l.], 1988. 241 s. Skriptum. VUT v Brně.
- [2] KOVÁŘ, R. *Zkoušení leteckých motorů*. [s.l.], 1962. 387 s. Skriptum. Vojenská Akademie Antonína Zápotockého.
- [3] KREIDL, M. *Měření teploty – senzory a měřicí obvody*. [s.l.], 2005. 240 s. ISBN 80-7300-145-4.
- [4] LIPTÁK, B. *Instrument engineers handbook*. [s.l.], 2003. 1424 s. ISBN 978-0801981975.
- [5] MIKAN, J. *Měření plynu*. GAS, Říčany u Prahy 2003, 1. vydání, 352 str. ISBN 80-7328-053-1
- [6] RŮŽEK, J. *Teorie leteckých motorů I*. [s.l.], 1971. 408 s. Skriptum. Vojenská Akademie Antonína Zápotockého.
- [7] *Omega* [online]. c1995-2007 [cit. 2010-04-13]. Omega-termočlánky. Dostupné z WWW: <<http://www.omegaeng.cz/prodinfo/thermocouples.html>>.
- [8] *Analog Devices* [online]. c1995-2010 [cit. 2010-04-13]. AD8571. Dostupné z WWW: <http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8571_8572_8574.pdf>.
- [9] *Analog Devices* [online]. c1995-2010 [cit. 2010-04-13]. TMP17. Dostupné z WWW: <<http://www.analog.com/en/sensors/digital-temperaturesensors/tmp17/products/product.html>>.
- [10] *NI Multisim* [počítačový program]. Ver. 11.0 pro Windows 7/Vista/XP/2000. National Instrument corporation, 2008. Dostupné z WWW: <<https://lumen.ni.com/nicif/us/evalmultisim/content.xhtml>>. Shareware.
- [11] *A.P.O. - ELMOS - měřicí a regulační technika* [online]. c1999 [cit. 2010-04-13]. A.P.O. - ELMOS - Plášťové termočlánky. Dostupné z WWW: <<http://www.apoelmos.cz/cz/infos-teplota9.htm>>.
- [12] *GHM - GREISINGER s.r.o., Praha* [online]. c1996-2010 [cit. 2010-04-13]. Snímače teploty >> NiCr-Ni (typ K). Dostupné z WWW: <<http://www.bartex.cz>>.

- [13] *JUMO* [online]. c2010 [cit. 2010-04-13]. Plášťové termočlánky. Dostupné z WWW: <<http://www.jumo.cz>>.
- [14] *Labfacility temperature and process technology* [online]. c2010 [cit. 2010-04-13]. Labfacility. Dostupné z WWW: <<http://www.temperaturesensors1.com/productsS/thermocouples>>.
- [15] *MESIT přístroje spol. s r. o.* [online]. c2008 [cit. 2010-04-13]. Přístroje pro měření fyzikálních veličin. Dostupné z WWW: <<http://www.msp.mesit.cz/cs/cat/515-pristroje-pro-mereni-fyzikalnich-velicin/1>>.
- [16] *QTEST* [online]. c2009 [cit. 2010-04-13]. Termočlánekové snímače typu K. Dostupné z WWW: <<http://www.qtest.cz/teplomery/teplotni-snimace-typ-k.htm>>.
- [17] *THERMOPROZESS s.r.o. - český výrobce měřicí a regulační techniky* [online]. c2004 [cit. 2010-04-13]. Termočlánekové senzory teploty a čidla Pt100 WATLOW . Dostupné z WWW: <<http://www.watlow.cz>>.
- [18] *ZPA Nová Paka, a.s.* [online]. c2006-2009 [cit. 2010-04-13]. Snímač teploty termoelektrický bez ochranné armatury (plášťové termočlánky). Dostupné z WWW: <<http://www.zpanp.cz/cs/produkty-a-sluzby/snimace-teploty-termoelektricke/plastove-bez-ochrann-armatury/snimac-teploty-termoelektricky-bez-ochrann-armatury-plastove-termoclanky-/38/>>.
- [19] Soubor:Turbojet operation- axial flow.png In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 14.12.2005, 14.12.2005 [cit. 2010-04-23]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Turbojet_operation_axial_flow.png>.
- [20] Soubor:Turbojet operation- centrifugal flow.png In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 14.12.2005, 14.12.2005 [cit. 2010-04-24]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Turbojet_operation-_centrifugal_flow.png>.
- [21] Soubor:Turbofan operation %28lbp%29.png In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 14.12.2005, 8.2.2006 [cit. 2010-04-24]. Dostupné z WWW:

<http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Turbofan_operation_%28lb%29.png>.

- [22] Soubor:Turbofan operation.png In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 14.12.2005, 14.12.2005 [cit. 2010-04-24]. Dostupné z WWW:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Turbofan_operation.png>.
- [23] Soubor:Turboshaft operation.png In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 14.12.2005, 14.12.2005 [cit. 2010-04-24]. Dostupné z WWW:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Turboshaft_operation.png>.
- [24] Soubor:Turboprop operation-en.svg In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 15.12.2005, 20.8.2009 [cit. 2010-04-24]. Dostupné z WWW:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Turboprop_operation-en.svg>.
- [25] *Omega* [online]. c1995-2007 [cit. 2010-04-13]. Omega-termočlánky. Dostupné z WWW: <<http://www.omega.com/temperature/Z/pdf/z021-032.pdf>>.

Seznam obrázků

Obr. 1: Rozdělení leteckých tryskových motorů [6].....	10
Obr. 2: Jednouproudový motor s axiálním kompresorem [19].....	11
Obr. 3: Jednouproudový motor s radiálním kompresorem [20].....	11
Obr. 4: p-V diagram Braytonova cyklu [6].....	12
Obr. 5: Dvouproudový motor s celkovým obtokem [21].....	12
Obr. 6: Dvouproudový motor s částečným předním obtokem [22].....	12
Obr. 7: Turbohrádelový motor [23].....	13
Obr. 8: Turbovrtulový motor [24].....	13
Obr. 9: Rozmístění čtyř snímačů teploty výfukových plynů na výfukové rouře.....	15
Obr. 10: Snímače teploty fy Mesit přístroje (zleva LUN1371, LUN1374 a LUN1377) [15]...16	
Obr. 11: Provedení měřicích konců termočlánekových snímačů [2].....	17
Obr. 12: Termoelektrický snímač teploty Labfacility typ XF-341-FAR.....	19
Obr. 13: Termočlánekové konektory fy Omega Engineering.....	21
Obr. 14: Teplotní závislost Seebeckova koeficientu pro různé typy termočláneků [25].....	23
Obr. 15: Princip měření termočlánekem [3].....	23
Obr. 16: Kompenzace srovnávacího spoje můstkem [1].....	24
Obr. 17: Kompenzace pomocí izotermální svorkovnice.....	25
Obr. 18: Zjednodušené schéma převodníku.....	26
Obr. 19: Funkční vzorek převodníku.....	29
Obr. 20: Přesný kalibrátor a teploměr Omega model CL521.....	30
Obr. 21: Multimetr Schlumberger Solartron 7151.....	30
Obr. 22: Multimetr UNI-T UT50C.....	30
Obr. 23: Regulovatelná pec Mora 524.....	31

Obr. 24: Chladicí zařízení NZ 350/75.....	31
Obr. 25: Teploměr Voltcraft K102.....	31
Obr. 26: Schéma zapojení kontroly parametrů převodníku v celém rozsahu pracovních teplot	32
Obr. 27: Schéma zapojení kontroly parametrů při změně napájecího napětí.....	32
Obr. 28: Schéma zapojení kontroly odebíraného proudu převodníkem.....	33

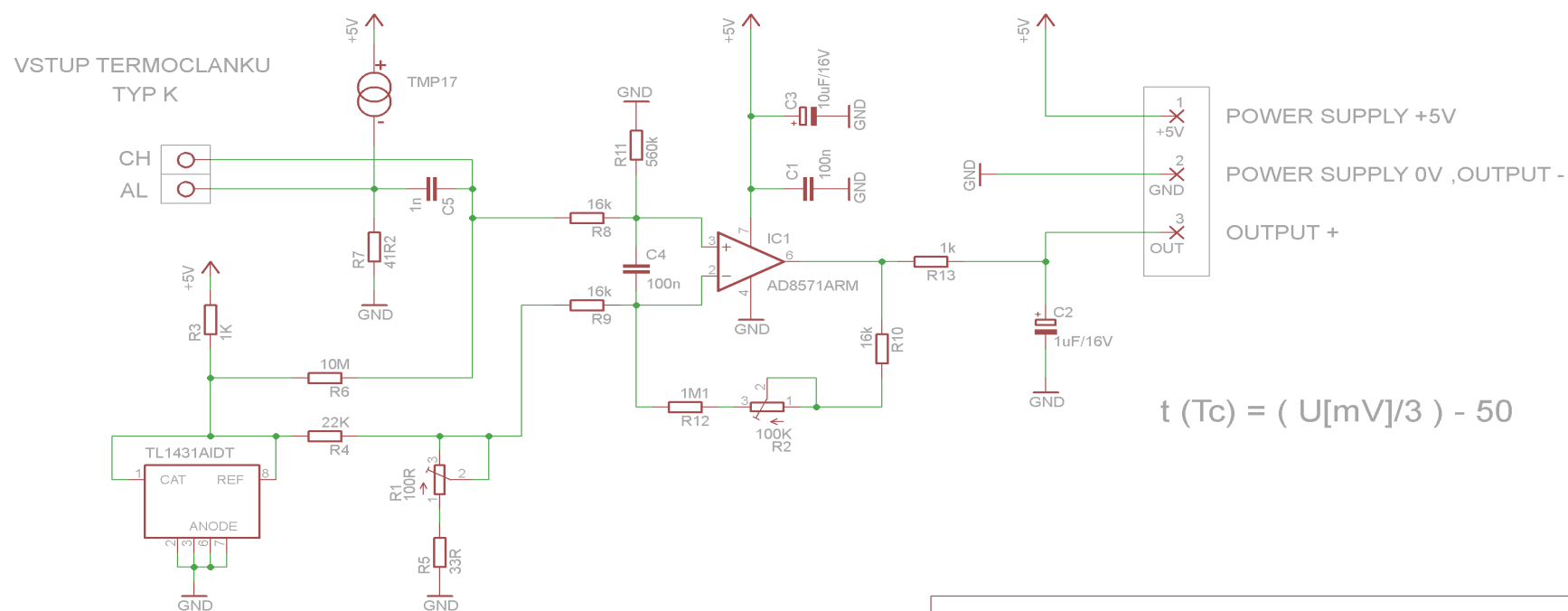
Seznam tabulek

Tabulka 1: Přehled vhodných termoelektrických snímačů teploty [11 – 14], [16 - 18].....	19
Tabulka 2: Hodnoty vygenerované v programu NI Multisim.....	28
Tabulka 3: Naměřené hodnoty výstupního napětí v rozsahu vstupních teplot +1000 °C až +1200 °C.....	36

Seznam příloh

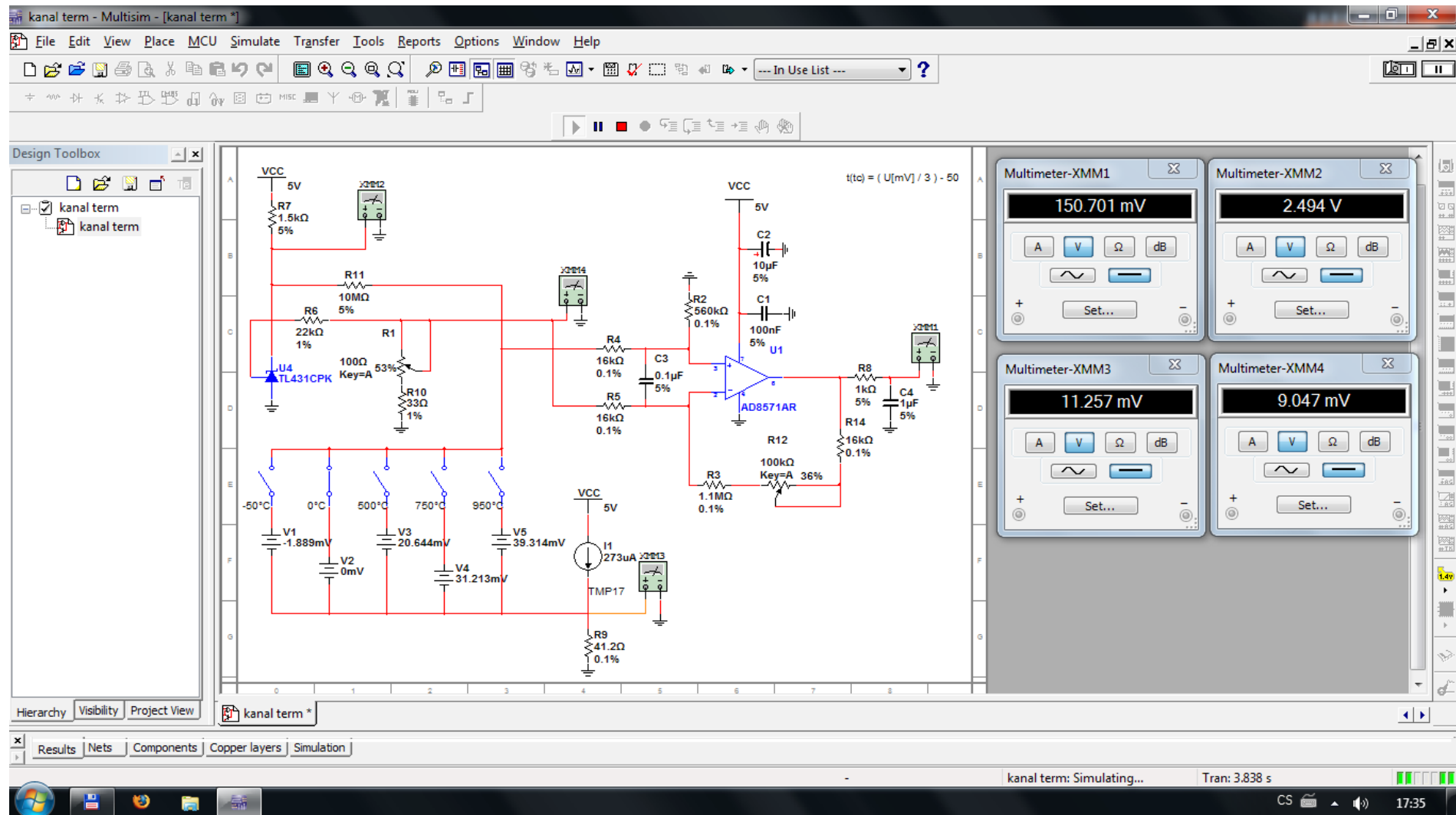
Příloha 1 - Schéma zapojení převodníku.....	43
Příloha 2 - Ukázka prostředí programu NI Multisim.....	44
Příloha 3 - Tabulka naměřených hodnot při teplotě okolí převodníku -40 °C, -20 °C a 0 °C. .	45
Příloha 4 - Tabulka naměřených hodnot při teplotě okolí převodníku +25 °C, +50 °C a +100 °C.....	46
Příloha 5 – Graf závislosti odchylek na vstupní teplotě při různých pracovních teplotách.....	47

Příloha 1 - Schéma zapojení převodníku



TITLE: prevodnik pro termoclanek typu K	
Document Number:	REV:
Date: 13.4.2010 20:45:29	Sheet: 1/1

Příloha 2 - Ukázka prostředí programu NI Multisim



Příloha 3 - Tabulka naměřených hodnot při teplotě okolí převodníku -40 °C, -20 °C a 0 °C

Vstupní teplota [°C]	Výstupní napětí v závislosti na teplotě okolí převodníku								
	-40°C			-20°C			0°C		
	U [mV]	t [°C]	Odchylka [°C]	U [mV]	t [°C]	Odchylka [°C]	U [mV]	t [°C]	Odchylka [°C]
-50	9,3	-46,9	3,1	13,6	-45,5	4,5	16,6	-44,5	5,5
-40	33,6	-38,8	1,2	38,2	-37,3	2,7	42,9	-35,7	4,3
-30	59,4	-30,2	-0,2	66,5	-27,8	2,2	69,1	-27,0	3,0
-20	89,3	-20,2	-0,2	93,7	-18,8	1,2	96,3	-17,9	2,1
-10	116,8	-11,1	-1,1	121,4	-9,5	0,5	123,8	-8,7	1,3
0	144,7	-1,8	-1,8	149,6	-0,1	-0,1	152,2	0,7	0,7
50	290,9	47,0	-3,0	295,6	48,5	-1,5	298,5	49,5	-0,5
100	439,8	96,6	-3,4	444,6	98,2	-1,8	447,3	99,1	-0,9
150	587,3	145,8	-4,2	591,5	147,2	-2,8	594,6	148,2	-1,8
200	731,4	193,8	-6,2	736,2	195,4	-4,6	738,5	196,2	-3,8
250	876,5	242,2	-7,8	882,1	244,0	-6,0	884,4	244,8	-5,2
300	1026,1	292,0	-8,0	1030,0	293,3	-6,7	1032,1	294,0	-6,0
350	1176,3	342,1	-7,9	1180,1	343,4	-6,6	1182,8	344,3	-5,7
400	1326,3	392,1	-7,9	1331,5	393,8	-6,2	1334,4	394,8	-5,2
450	1479,6	443,2	-6,8	1484,4	444,8	-5,2	1487,5	445,8	-4,2
500	1633,0	494,3	-5,7	1637,5	495,8	-4,2	1640,7	496,9	-3,1
550	1786,1	545,4	-4,6	1791,0	547,0	-3,0	1793,9	548,0	-2,0
600	1940,2	596,7	-3,3	1945,1	598,4	-1,6	1947,9	599,3	-0,7
650	2092,6	647,5	-2,5	2097,5	649,2	-0,8	2100,0	650,0	0,0
700	2243,9	698,0	-2,0	2249,1	699,7	-0,3	2251,8	700,6	0,6
750	2394,2	748,1	-1,9	2399,9	750,0	0,0	2401,6	750,5	0,5
800	2542,8	797,6	-2,4	2548,4	799,5	-0,5	2550,4	800,1	0,1
850	2689,3	846,4	-3,6	2696,1	848,7	-1,3	2697,8	849,3	-0,7
900	2834,0	894,7	-5,3	2840,3	896,8	-3,2	2842,6	897,5	-2,5
950	2977,6	942,5	-7,5	2983,8	944,6	-5,4	2986,5	945,5	-4,5

Příloha 4 - Tabulka naměřených hodnot při teplotě okolí převodníku +25 °C, +50 °C a +100 °C

Vstupní teplota [°C]	Výstupní napětí v závislosti na teplotě okolí převodníku								
	+25°C			+50°C			+100°C		
	U [mV]	t [°C]	Odchylka [°C]	U [mV]	t [°C]	Odchylka [°C]	U [mV]	t [°C]	Odchylka [°C]
-50	20,3	-43,2	6,8	20,2	-43,3	6,7	18,8	-43,7	6,3
-40	46,2	-34,6	5,4	45,6	-34,8	5,2	44,8	-35,1	4,9
-30	73,0	-25,7	4,3	72,6	-25,8	4,2	71,5	-26,2	3,8
-20	100,7	-16,4	3,6	100,1	-16,6	3,4	99,6	-16,8	3,2
-10	128,2	-7,3	2,7	128,0	-7,3	2,7	127,1	-7,6	2,4
0	156,4	2,1	2,1	156,0	2,0	2,0	154,3	1,4	1,4
50	302,2	50,7	0,7	302,4	50,8	0,8	300,7	50,2	0,2
100	450,5	100,2	0,2	451,6	100,5	0,5	450,8	100,3	0,3
150	599,3	149,8	-0,2	598,4	149,5	-0,5	599,1	149,7	-0,3
200	743,1	197,7	-2,3	743,4	197,8	-2,2	743,7	197,9	-2,1
250	889,2	246,4	-3,6	889,3	246,4	-3,6	889,9	246,6	-3,4
300	1037,1	295,7	-4,3	1038,1	296,0	-4,0	1038,3	296,1	-3,9
350	1187,2	345,7	-4,3	1187,6	345,9	-4,1	1188,8	346,3	-3,7
400	1339,3	396,4	-3,6	1339,9	396,6	-3,4	1341,1	397,0	-3,0
450	1492,1	447,4	-2,6	1492,3	447,4	-2,6	1493,7	447,9	-2,1
500	1645,2	498,4	-1,6	1646,6	498,9	-1,1	1648,5	499,5	-0,5
550	1798,8	549,6	-0,4	1800,2	550,1	0,1	1802,1	550,7	0,7
600	1953,1	601,0	1,0	1954,2	601,4	1,4	1956,8	602,3	2,3
650	2104,6	651,5	1,5	2106,7	652,2	2,2	2109,9	653,3	3,3
700	2256,3	702,1	2,1	2258,2	702,7	2,7	2262,6	704,2	4,2
750	2407,6	752,5	2,5	2409,2	753,1	3,1	2411,7	753,9	3,9
800	2556,6	802,2	2,2	2557,9	802,6	2,6	2561,5	803,8	3,8
850	2703,5	851,2	1,2	2705,5	851,8	1,8	2709,1	853,0	3,0
900	2848,2	899,4	-0,6	2850,2	900,1	0,1	2854,8	901,6	1,6
950	2992,0	947,3	-2,7	2994,4	948,1	-1,9	2998,5	949,5	-0,5

Příloha 5 – Graf závislosti odchylek na vstupní teplotě při různých pracovních teplotách

